

Early recognition of damage in rotary machines, such as gearwheels, bearings and motors, by measuring significant acutely occurring changes in acoustic behavior of assembly or structure

Patent number: DE19902326
Publication date: 2000-08-10
Inventor: JONUSCHEIT HORST (DE); STRAMA OLAF (DE); THOMAE REINER (DE)
Applicant: MEDAV DIGITALE SIGNALVERARBEIT (DE)
Classification:
- **International:** G01M15/00; G01M7/02; G01M13/00
- **European:** G01M13/02M
Application number: DE19991002326 19990121
Priority number(s): DE19991002326 19990121

Report a data error here

Abstract of DE19902326

Acoustic signals of rotating machine as well as rotational speed of reference component of the machine are recorded. Rotational speed of drive shaft is digitized and analyzed, using known order analysis to determine spectral components of continuously occurring acoustic signals, and suitable algorithms are used to provide true-to-expectation value estimate of order spectrum. Various status changes are measured and compared to a threshold. Operating statuses to be distinguished are connected at fixed rotation speed ranges. Maximum rotation speed range is divided into intervals of pertinent adaptation and monitoring phases, with pertinent thresholds determined for every operating status of machine and change measure.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 199 02 326 C 2

⑤1 Int. Cl. 7:
G 01 M 15/00
G 01 M 7/02
G 01 M 13/00

②1 Aktenzeichen: 199 02 326.3-52
②2 Anmeldetag: 21. 1. 1999
④3 Offenlegungstag: 10. 8. 2000
④5 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 8. 5. 2003

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:
Medav Digitale Signalverarbeitung GmbH, 91080
Uttenreuth, DE

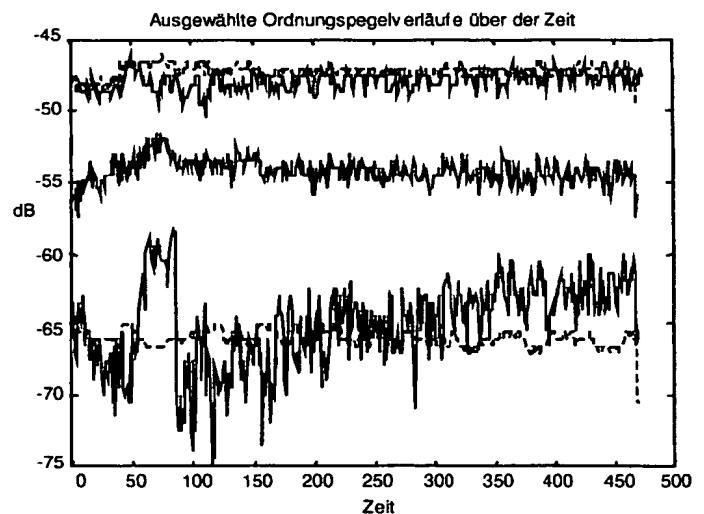
⑦2 Erfinder:
Jonuscheit, Horst, 91077 Dormitz, DE; Strama, Olaf,
91077 Dormitz, DE; Thomä, Reiner, Prof. Dr., 98693
Ilmenau, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 195 45 008 A1
DE 41 16 345 A1
DE 38 12 474 A1
DE 32 45 505 A1
DE 69 421 39 3T2

⑤4 Verfahren zur Schadensfrüherkennung von rotierenden Maschinen

- ⑤7 Verfahren zur Schadensfrüherkennung von rotierenden Maschinen durch Auswertung ihres emittierten Schalls mit folgenden Verfahrensschritten:
- Aufzeichnung und Digitalisierung von akustischen Signalen der rotierenden Maschine,
 - lückenlose Bestimmung der spektralen Komponenten der akustischen Signale durch Verwendung der Ordnungsanalyse,
 - Berechnung einer Kenngröße A aus den zentrierten und gewichteten Ordnungspegeln C_y ,
 - Ermittlung eines varianzgewichteten und durch vorbestimmte Signalverarbeitungsalgorithmen geglätteten Ordnungssummenpegels A_s aus den Kenngrößen A ,
 - Errechnung eines Änderungsmaßes λ aus dem Verhältnis von Ordnungssummenpegeln A_s , welche zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ermittelt wurden,
 - vergleichen des Änderungsmaßes λ mit einem vorzugebenden Schwellwert.



DE 199 02 326 C 2

DE 199 02 326 C 2

Beschreibung

[0001] Rotierende Maschinen im Sinne dieser Beschreibung sind Maschinen, die neben fest stehenden Teilen auch rotierende Teile wie z. B. Zahnräder, Lager und Wellen enthalten. Besondere Bedeutung haben hierbei Fahrzeuggetriebe, Elektro- und Verbrennungsmotoren, Turbinen sowie Prüfstände für diese Aggregate.

[0002] Rotierende Teile emittieren Schwingungen und Geräusche. Die geeignete Auswertung dieser akustischen Meßgrößen liefert Informationen zum Zustand des Prüflings.

[0003] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Erkennung von signifikanten, akut auftretenden Veränderungen im akustischen Verhalten des Prüfaufbaus bestehend aus Prüfstand und Prüfling, welche auf ein aufgetretenes Schadensereignis rückschließen lassen.

[0004] Es sind verschiedene Verfahren zur Maschinenüberwachung und Schadenserkenkung wie Risse, Abnutzung, Materialermüdung in einem frühen Stadium bekannt. Hierzu werden maschinenspezifische Meßgrößen wie z. B. Schwingungen und Geräusche ausgewertet, sofern sich der entstehende Schaden in diesen Meßgrößen abbildet.

[0005] Aus DE 38 12 474 A1 ist eine Einrichtung zur Überwachung von Wälzlagern bekannt, die durch eine fehlerspezifische Frequenzanalyse der akustische Signale des Wälzlagers und dem Vergleich mit einem korrespondierenden Referenzwert die Schadensbeurteilung durchführt.

[0006] Ein Verfahren unter Verzicht auf eine Referenz wird in DE 32 45 505 A1 vorgeschlagen. Hier werden Schallsignale im hoch- bzw. tieffrequenten Bereich mittels zwei entsprechend angeordneten Sensoren erfaßt und zu einer Größe verarbeitet, deren Anstieg zu überwachen ist. Gemäß DE ist dieses Verfahren zur Überwachung von Wälzlagern, Getrieben und Turbinenanlagen vorgesehen.

[0007] Aus DE 195 45 008 A1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung bekannt, die eine Überwachung von periodisch arbeitenden Maschinen zur Früherkennung von Maschinenveränderungen durch permanenten Vergleich aktueller statistischer Kennwerte mit Referenzwerten ermöglichen. Die wesentlichen Unterschiede dieser DE mit dem hier vorgeschlagenen Verfahren liegen in den eingesetzten mathematischen Analysemethoden, der Bildung eines gleitenden Referenzwertes (im vorgeschlagenen Verfahren) zur Eliminierung des Einflusses zulässiger Zustandsänderungen und der fehlenden Möglichkeit (in der genannten DE) zur Erhöhung der Sensitivität des Verfahrens durch Ausnutzung der a-priori Kenntnissen über mögliche Betriebszustände.

[0008] Im Gegensatz zu DE 195 45 008 A1 werden im hier beschriebenen Verfahren statistische Kenngrößen, welche aus dem Ordnungsspektrum berechnet werden, nicht direkt zur Klassifikation herangezogen. Vielmehr werden die spektralen Signalanteile mit Hilfe von statistischen Kenngrößen konditioniert. Diese Konditionierung hat zur Folge, daß das Verfahren selektiv gegenüber sehr kleinen Änderungen des Prüfobjekts wird, welche nicht dem normalen Verhalten entsprechen. Änderungen des Prüfobjekts, die für das normale Verhalten des Prüflings charakteristisch sind, werden hingegen unterdrückt. Die normalen Änderungen dürfen dabei wesentlich größere Werte annehmen als die zu detektierenden Änderungen.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art zu entwickeln, das universell einsetzbar ist und ohne die Bereitstellung von Referenzwerten arbeiten kann. Das Verfahren kann somit zur Überwachung von Prüflingen herangezogen werden, über deren normales Verhalten zum Beginn der Überwachung noch keine gesicherten Kenntnisse vorliegen. Weiterhin können Fehlerzustände detektiert werden, die vormals noch nie aufgetreten waren, sofern diese eine Änderung der verwendeten Meßgrößen bewirken.

[0010] Erfindungsgemäß wird die gestellte Aufgabe durch die im Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

[0011] Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen des Verfahrens sind in den Unteransprüchen 2 bis 7 angegeben. Die mit der Erfindung erzielbaren Vorteile ergeben sich aus der folgenden Beschreibung.

[0012] Erfindungsgemäß werden akustische Signale der rotierenden Maschine sowie die Drehzahl einer Bezugskomponente der Maschine, z. B. die Drehzahl der Antriebswelle, aufgezeichnet, digitalisiert und nach der im folgenden beschriebenen Signalverarbeitungsmethode analysiert.

[0013] Die Bestimmung der spektralen Komponenten der akustischen Signale erfolgt lückenlos durch Verwendung der bekannten Ordnungsanalyse. Ein Verfahren zur Ordnungsanalyse, das auf digitalem Resampling aufsetzt, ist in Groppe, Jonuscheit, Strama, Thomä: "Ordnungsanalyse", Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung, MESSCOMP 1996, expert Verlag, 1996, beschrieben. Zur Bereitstellung einer erwartungswerttreuen Schätzung des Ordnungsspektrums werden geeignete Algorithmen verwendet. Aus den Ordnungsspektren werden die Ordnungspegel $C(\mu, nt_a)$ als Verlauf der einzelnen Ordnungen über der Zeit nt_a bestimmt. Dabei entspricht t_a der Analysezeitdauer, über die ein Ordnungsspektrum berechnet wird. Die Variable n beschreibt den Zeitpunkt der Analyse in diskreten Schritten von t_a . Der Index μ bezeichnet die betrachtete Linie des Ordnungsspektrums.

[0014] Fig. 1 zeigt fünf ausgewählte Ordnungspegelverläufe, wie sie sich vor einem realen Schadensereignis dargestellt haben.

[0015] Die statistischen Kenngrößen linearer Mittelwert $m_l(\mu, nt_a)$, quadratischer Mittelwert $m_q(\mu, nt_a)$ und Varianz $v(\mu, nt_a)$ jedes einzelnen Ordnungspegels $C(\mu, nt_a)$ werden entsprechend Formel [I] gleitend ermittelt.

$$m_l(\mu, nt_a) = k_1 m_l(\mu, (n-1)t_a) + k_2 C(\mu, nt_a), \quad k_1 + k_2 = 1 \quad [\text{Ia}]$$

$$m_q(\mu, nt_a) = k_1 m_q(\mu, (n-1)t_a) + k_2 C(\mu, nt_a)^2, \quad k_1 + k_2 = 1 \quad [\text{Ib}]$$

$$v(\mu, nt_a) = m_q(\mu, nt_a) - m_l(\mu, nt_a)^2 \quad [\text{Ic}]$$

[0016] Der betreffende Ordnungspegel wird zentriert und mit einem aus der aktuellen Varianz ermittelten Faktor in der Form entsprechend Formel [II] gewichtet, daß Ordnungspegelverläufe mit hoher Varianz wenig und solche mit niedriger Varianz stark in das Klassifikationsergebnis eingehen.

$$C_v(\mu; nt_a) = (C(\mu, nt_a) - m_1(\mu, (n-1)t_a)) / (v(\mu, (n-1)t_a) + k), k = 0 \dots 1 \quad \text{[III]}$$

[0017] Einerseits werden durch diese Wichtung Änderungen der Ordnungspegel, welche für den normalen Zustand des Prüfbjektivs charakteristisch sind, unterdrückt. Andererseits werden selbst minimale Pegeländerungen, welche für den normalen Lauf untypisch sind, "verstärkt" und können das Klassifikationsergebnis signifikant beeinflussen. 5

[0018] Aus den zentrierten und gewichteten Ordnungspegeln $C_v(\mu, nt_a)$ wird mit Hilfe der Vorschrift nach Gleichung [III] eine Kenngrößen $A(nt_a)$ berechnet, welche das Verhalten des Prüfbjektivs über der Zeit repräsentieren.

$$A(nt_a) = \sum_{\mu=M_1}^{M_2} C_v(\mu, nt_a) \quad , M_1, M_2 = 0 \dots O_{\max} \quad \text{[III]} \quad 10$$

[0019] M_1, M_2 repräsentieren den Ordnungsspektralbereich, der für die Analyse herangezogen wird.

[0020] Fig. 2 gibt einen varianzgewichteten Ordnungssummenpegel $A(nt_a)$ wieder, wie er sich vor einem realen Schadensereignis dargestellt hat. 15

[0021] Diese Kenngrößen ermöglichen die Detektion verschiedener Fehlerzustände. Plötzliche Änderungen der Kenngrößen lassen auf akute Änderungen des Prüflings schließen. Unter Verwendung von Gleichung [IV] wird aus der Kenngröße $A(nt_a)$ ein Merkmal $\lambda(nt_a)$ berechnet, welches die sprunghaften Änderungen des Prüfbjektivs anzeigt.

$$\lambda(nt_a) = A_s(nt_a) / A_s((n-1)t_a) \quad \text{[IV]} \quad 20$$

[0022] Zur Reduzierung des Einflusses aus Alterung und natürlichem Verschleiß des Prüfbjektivs wird der varianzgewichtete Ordnungssummenpegel vor Anwendung der Vorschrift nach Gleichung [IV] mittels digitalem FIR-Filter gemäß Gleichung [V] geglättet. 25

$$A_s(nt_a) = \sum_{f=0}^{N_f} F(f) A((n - N_f + f)t_a) \quad , F(f): \text{Filterkoeffizienten}, N_f: \text{Filtergrad} \quad \text{[V]} \quad 25$$

[0023] Fig. 3 zeigt das somit ermittelte Änderungsmaß λ für den varianzgewichteten Ordnungssummenpegel, wie er sich vor einem realen Schadensereignis dargestellt hat. 30

[0024] Das vorgeschlagene Verfahren kann für beliebige rotierende Maschinen ohne jegliche konstruktiven Vorkenntnisse eingesetzt werden. Wird die Überwachung einer Maschine eingerichtet, so sind Akustik-Sensoren, z. B. Körperschallaufnehmer und Mikrophone, an den Maschinen geeignet anzubringen.

[0025] Zu Beginn einer Überwachungsaufgabe werden die akustischen Signale in oben beschriebener Weise analysiert. Das Adaptionsmaß Θ , welches gemäß [VIa] und [VIb] berechnet wird, stellt sich dabei automatisch in einer "Adaptionsphase" auf einen Bezugswert ein. 35

$$\alpha(nt_a) = A(nt_a) - A((n-1)t_a) \quad \text{[VIa]} \quad 40$$

$$\Theta(nt_a) = \sum_{f=0}^{N_f} F(f) \alpha((n - N_f + f)t_a) \quad , F(f): \text{Filterkoeffizienten}, N_f: \text{Filtergrad} \quad \text{[VIb]} \quad 40$$

[0026] Die Dauer der Adaptionsphase ist grundsätzlich abhängig vom zu überwachenden Maschinentyp, da das Anlaufverhalten der Maschine, bis stationäre Betriebsbedingungen erreicht sind, großen Einfluß auf die Varianz der Ordnungen haben kann. Das vorgeschlagene Verfahren überwacht die Entwicklung des Adaptionsmaßes Θ , und sobald Θ über eine Zeitdauer $T = lt_a$ unter einer festzulegenden Schwelle liegt, gilt die Adaptionsphase als beendet und die Überwachungsphase beginnt automatisch. 45

[0027] Überschreitet das Änderungsmaß λ in der Überwachungsphase einen extern vorzugebenden, auf Erfahrung beruhenden Schwellwert, so ist ein Schadensfall erkannt worden. 50

[0028] Überschreitet das Adaptionsmaß Θ in der Überwachungsphase einen vorzugebenden, auf Erfahrung beruhenden Schwellwert, so wird λ als nicht aussagekräftig bewertet, da das System sich auf das veränderte Verhalten des Prüflings adaptieren muß.

[0029] Konstruktive Kenntnisse über die Maschine können genutzt werden, um z. B. Signalbandbreite und Ordnungsauflösung für eine vorteilhafte meßtechnische Umsetzung des Verfahrens festzusetzen. 55

[0030] Eine mehrkanalige Realisierung des Verfahrens kann durch die konstruktive Beschaffenheit des Prüfbjektivs sinnvoll sein, um auftretende Fehler im Sensorsignal besser zu erfassen.

[0031] Eine vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens berücksichtigt die endliche Zahl von Betriebszuständen, in denen die Überwachung erfolgt. Das Prinzip dabei ist, daß für jeden Betriebszustand B_i der Maschine ein Änderungsmaß λ_i bestimmt wird, das beim Erstanlauf des Betriebszustandes B_i in einer Adaptionsphase eingestellt wird. 60

[0032] Eine spezielle Ausführung ist, daß die zu unterscheidenden Betriebszustände an feste Drehzahlbereiche gekoppelt sind. Der maximale Drehzahlbereich d_{\max} der zu überwachenden Maschine wird dabei in I festzulegende Drehzahlintervalle aufgeteilt, wobei die Drehzahlintervalle sich auch überlappen oder auch lückenhaft aneinandergereiht sein dürfen. Das vorgeschlagene Verfahren ermittelt für jedes Drehzahlintervall D_i ein Änderungsmaß λ_i , das beim Erstanlauf des Drehzahlintervalls in einer Adaptionsphase eingestellt wird. 65

[0033] Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in der erhöhten Sensitivität des Verfahrens, da bei der Bestimmung des Änderungsmaßes λ verschiedene Betriebszustände (und damit unterstellterweise unterschiedliches akustisches Verhalten)

unterschieden werden, die nicht mit einer Schädigung der Maschine im Bezug stehen; λ_i wird insgesamt "glatteren" Verlauf haben. Die Adaptionsphasen für wiederholt auftretende Betriebszustände bzw. Drehzahlintervalle können verkürzt werden, wenn das letztmalige Auftreten des betreffenden Betriebszustandes B_i bzw. Drehzahlintervalls D_i nicht länger als die Zeitdauer T_{B_i} bzw. T_{D_i} zurückliegt und der "alte" varianzgewichtete Ordnungssummenpegel $A_{si}((n-1)t_a)$ noch als Referenz zur Berechnung von λ_i angenommen werden kann. Die Zeitdauer T_{B_i} für die i Betriebszustände sind durch Erfahrungswerte festzusetzen. Fig. 4 verdeutlicht das Prinzip zur Einteilung des maximalen Drehzahlbereichs in Drehzahlintervalle und den zugehörigen Adaptions- und Überwachungsphasen.

[0034] Eine vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens berücksichtigt, daß von bestimmten zu überwachenden Komponenten des Prüfobjekts determinierte, a-priori bekannte Ordnungsspektralanteile emittiert werden. Zur sensitiven Überwachung der einzelnen Komponenten einer rotierenden Maschine unabhängig voneinander können für mehrere Sätze von Ordnungslinien M_j jeweils ein Änderungsmaß λ_j ermittelt werden. Unter Berücksichtigung verschiedener Betriebszustände B_i bzw. Drehzahlbereiche D_i bedeutet dies, daß in allen Betriebszuständen B_i bzw. Drehzahlbereichen D_i für jedes M_j ein Änderungsmaß λ_{ij} berechnet wird, das beim Erstanlauf des Betriebszustandes B_i bzw. Drehzahlintervalls D_i in einer Adaptionsphase eingestellt wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Schadensfrüherkennung von rotierenden Maschinen durch Auswertung ihres emittierten Schalls mit folgenden Verfahrensschritten:

- Aufzeichnung und Digitalisierung von akustischen Signalen der rotierenden Maschine,
- lückenlose Bestimmung der spektralen Komponenten der akustischen Signale durch Verwendung der Ordnungsanalyse,
- Berechnung einer Kenngröße A aus den zentrierten und gewichteten Ordnungspegeln C_y ,
- Ermittlung eines varianzgewichteten und durch vorbestimmte Signalverarbeitungsalgorithmen geglätteten Ordnungssummenpegels A_s aus den Kenngrößen A ,
- Errechnung eines Änderungsmaßes λ aus dem Verhältnis von Ordnungssummenpegeln A_s , welche zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ermittelt wurden,
- vergleichen des Änderungsmaßes λ mit einem vorzugebenden Schwellwert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur sensitiven Überwachung einzelner Maschinenkomponenten unabhängig voneinander für mehrere Sätze von Ordnungslinien M_j jeweils ein Änderungsmaß λ_j ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß durch eine mehrkanalige Anordnung die konstruktiven Eigenschaften der zu überwachenden Maschine insofern besser berücksichtigt werden, als daß die Sensoren näher am möglichen Fehlerort sind und damit der akustische Einfluß des Fehlers im Schallsignal verstärkt enthalten ist.

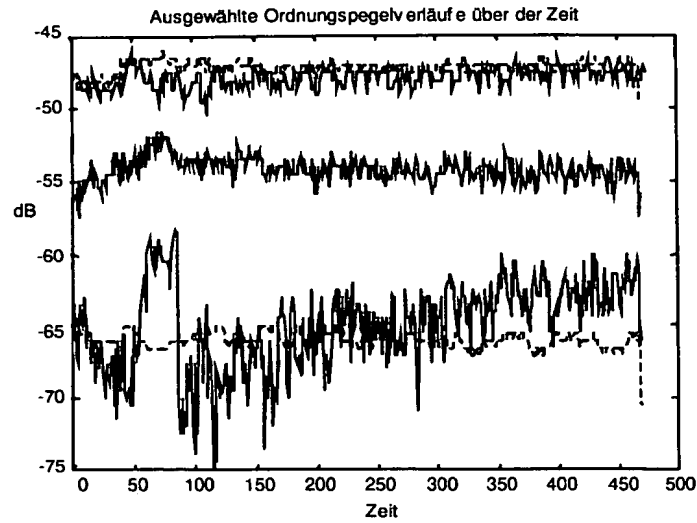
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß für jeden Betriebszustand B_i , der Maschine ein Änderungsmaß λ_{ij} bestimmt und ein zugehöriger Schwellwert vorgegeben wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Adaptionsphase für wiederholt erreichte Betriebszustände B_i entfällt, indem der betriebszustandspezifische, varianzgewichtete Ordnungssummenpegel $A_{si}((n-1)t_a)$ als Referenz zur Berechnung von λ_{ij} weiterverwendet wird, sofern das wiederholte Anlaufen des Betriebszustands B_i nicht später als eine vorzugebende Zeitdauer T_{B_i} erfolgt.

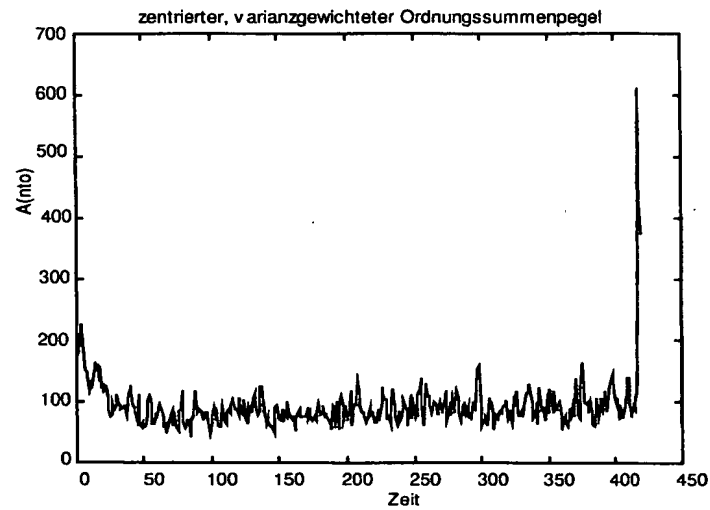
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der maximale Drehzahlbereich der Maschine in Drehzahlintervalle unterteilt wird, und für jedes Drehzahlintervall D_i ein Änderungsmaß λ_{ij} bestimmt und ein zugehöriger Referenzwert vorgegeben wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Adaptionsphase für wiederholt erreichte Drehzahlintervalle D_i entfällt, indem der betriebszustandspezifische, varianzgewichtete Ordnungssummenpegel $A_{si}((n-1)t_a)$ als Referenz zur Berechnung von λ_{ij} weiterverwendet wird, sofern das wiederholte Anlaufen des Drehzahlintervalls D_i nicht später als eine vorzugebende Zeitdauer T_{D_i} erfolgt.

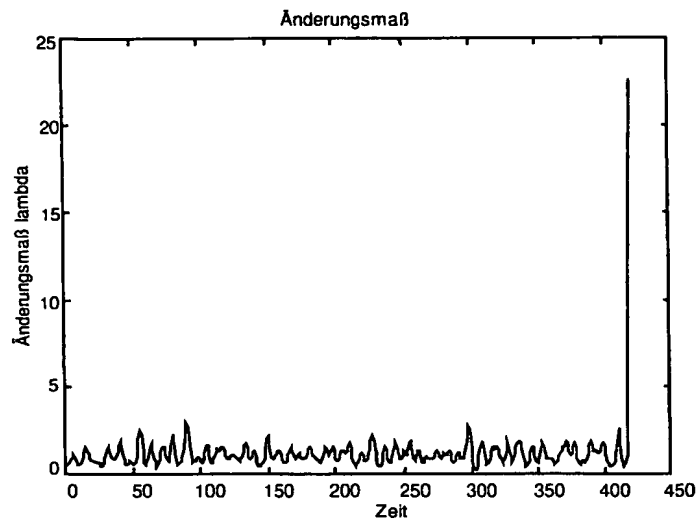
Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen



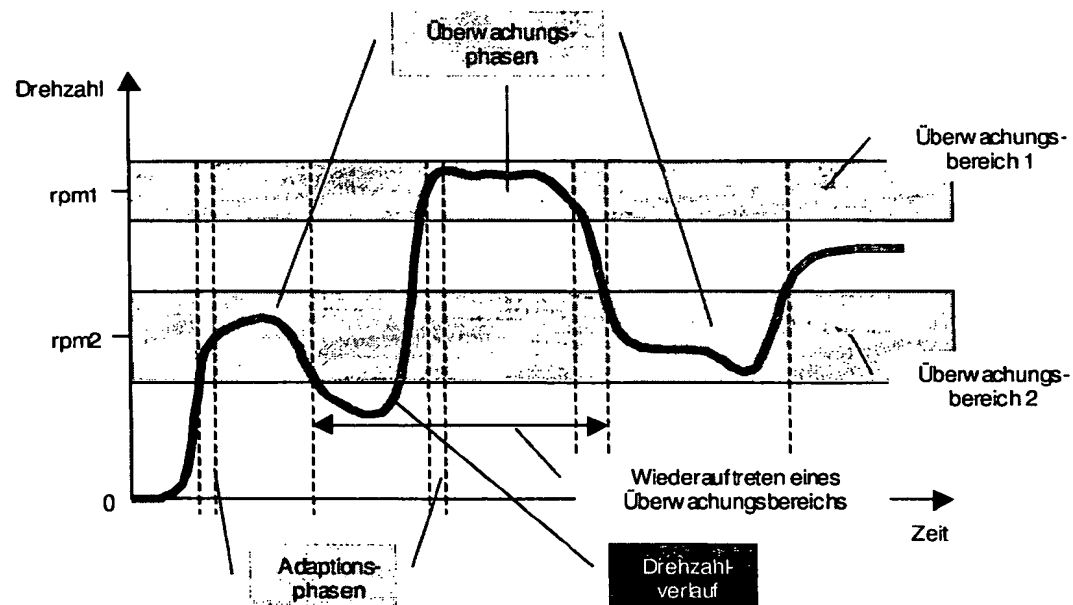
Figur 1



Figur 2



Figur 3



Figur 4